

Halbleitertechnologie von A bis Z

Optoelektronik & Photonik

Leuchtdioden (LED)	3
Aufbau und Funktionsprinzip	3
Materialsysteme nach Farbe	3
Quantum Wells zur Effizienzsteigerung	4
Droop-Effekt und Auskopplungseffizienz	5
Von der Emission zur nutzbaren Lichtleistung	6

Leuchtdioden (LED)

Aufbau und Funktionsprinzip

Eine LED ist im Kern ein in Durchlassrichtung betriebener pn-Übergang aus einem direkten Halbleiter. Legt man eine Vorwärtsspannung an, senkt sich die Potentialbarriere der Raumladungszone, und Elektronen aus der n-Seite sowie Löcher aus der p-Seite werden über die Verarmungszone hinweg injiziert – man spricht von Minoritätsträgerinjektion. Im aktiven Bereich treffen beide Ladungsträgertypen aufeinander und rekombinieren strahlend, wie im Grundlagenkapitel beschrieben; die Photonenenergie entspricht dabei näherungsweise der Bandlücke des Materials, leicht reduziert durch die thermische Energieverteilung der Ladungsträger (daher ist das Emissionsspektrum kein scharfer Peak, sondern hat eine spektrale Breite von typischerweise 20–30 nm bei Raumtemperatur). Anders als beim Si-pn-Übergang, der primär als Diode oder Solarzelle genutzt wird, ist bei der LED die Lichtemission der eigentliche Zweck, nicht Nebeneffekt.

Die Durchlassspannung einer LED korreliert direkt mit der Bandlücke: Faustregel $V_f \approx E_g/e$, leicht erhöht durch Serienwiderstände und Kontaktverluste. Eine rote AlGaInP-LED ($E_g \approx 2$ eV) hat daher eine typische Flussspannung um 1,8–2,2 V, eine blaue InGaN-LED ($E_g \approx 2,7$ eV) liegt bei 2,8–3,4 V – deutlich höher als bei einer klassischen Si-Diode ($\approx 0,7$ V), was sich direkt in der benötigten Betriebsspannung von LED-Schaltungen niederschlägt. Der Wirkungsgrad hängt entscheidend davon ab, wie viele Ladungsträger tatsächlich strahlend statt nichtstrahlend rekombinieren – gesteuert durch Dotierqualität, Defektdichte und Grenzflächenzustände im Kristall, die als Rekombinationszentren wirken und Ladungsträger ohne Photonemission "verschlucken".

Materialsysteme nach Farbe

Die Emissionsfarbe folgt direkt aus der Bandlücke des Materials, weshalb jede LED-Farbe ihr eigenes etabliertes System hat. Rote und gelbe LEDs basieren auf AlGaInP-Heterostrukturen auf GaAs-Substrat, gitterangepasst durch die Wahl des Aluminium-Gallium-Verhältnisses. Infrarot- und einfache rote LEDs nutzen historisch auch GaAsP oder AlGaAs. Blaue und grüne LEDs nutzen InGaN auf Saphir- oder SiC-Substrat – trotz erheblicher Gitterfehlانpassung zum Substrat (bis zu 16 % bei GaN-auf-Saphir), was zu hohen Versetzungsdichten führt, die die Materialqualität lange limitierten.

Die technologische Reife von InGaN in den 1990er-Jahren (Shuji Nakamura,

Nobelpreis Physik 2014) war die entscheidende Voraussetzung für effiziente weiße LEDs, da zuvor nur Rot und Gelb in ausreichender Effizienz verfügbar waren – das sogenannte "Green Gap" (mangelnde Effizienz grüner LEDs zwischen den gut beherrschten Systemen InGaN/blau und AlGaInP/gelb) ist bis heute ein aktives Forschungsthema. Weißes Licht entsteht heute überwiegend nicht durch additive RGB-Mischung, sondern durch eine einzelne blaue InGaN-LED (Peak $\approx 450\text{--}460\text{ nm}$), deren Licht teilweise von einem gelben Phosphor (meist Ce:YAG, Cer-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat) durch Photolumineszenz in längerwelliges Licht (Peak $\approx 560\text{ nm}$) umgewandelt wird. Die Kombination aus durchscheinendem Blau und angeregtem Gelb ergibt für das menschliche Auge einen weißen Farbeindruck; über Phosphor-Mischungen und -Dicke lässt sich die Farbtemperatur (warmweiß bis kaltweiß) sowie der Farbwiedergabeindex (CRI) gezielt einstellen.

Quantum Wells zur Effizienzsteigerung

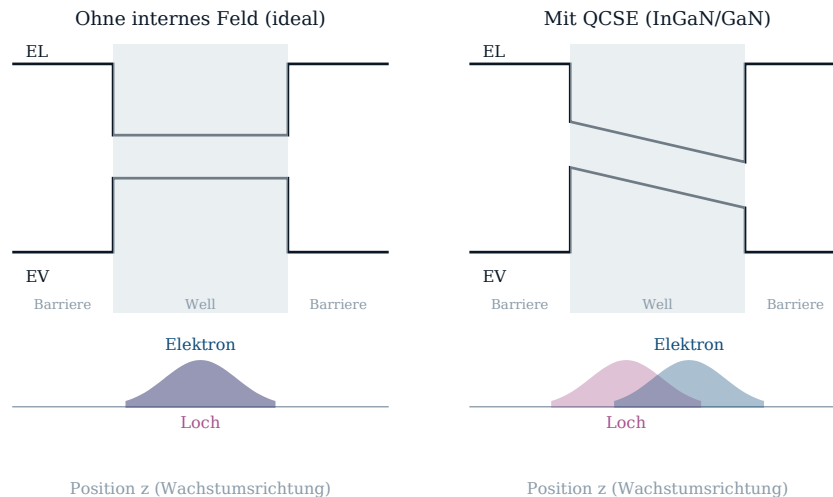
Moderne LEDs nutzen keinen einfachen homogenen pn-Übergang, sondern eine aktive Zone aus mehreren Quantum Wells (MQW, Multiple Quantum Wells): dünne Schichten (typisch 2–5 nm) eines Materials mit kleinerer Bandlücke, eingebettet zwischen Barriereschichten mit größerer Bandlücke – bei InGaN/GaN-LEDs etwa dünne InGaN-Wells zwischen GaN-Barrieren. Ladungsträger werden in diesen Potentialtöpfen quantenmechanisch räumlich eingesperrt (Quantum Confinement), wodurch sich die Zustandsdichte von einer kontinuierlichen 3D- zu einer stufenförmigen 2D-Verteilung ändert. Das erhöht die effektive Ladungsträgerdichte im aktiven Volumen und damit die strahlende Rekombinationsrate deutlich gegenüber einem dicken, unstrukturierten Übergang.

Über die Well-Dicke und Materialzusammensetzung lässt sich die effektive Bandlücke und damit die Emissionswellenlänge fein einstellen – bei InGaN/GaN-Systemen typischerweise über den Indium-Gehalt (höherer In-Anteil senkt die Bandlücke, verschiebt die Emission Richtung Grün) in Kombination mit der Well-Breite. Eine materialspezifische Komplikation bei InGaN/GaN ist der Quantum-Confined Stark-Effekt (QCSE): Da GaN entlang der c-Achse piezoelektrisch und spontan polarisiert ist, entstehen an den Well-Grenzflächen starke interne elektrische Felder (mehrere MV/cm), die Elektronen und Löcher räumlich innerhalb des Wells trennen. Das verringert die Überlappung ihrer Wellenfunktionen und damit die strahlende Rekombinationswahrscheinlichkeit – ein Effekt, der bei hohem Indium-Gehalt (grüne LEDs) besonders ausgeprägt ist und mitverantwortlich für das erwähnte Green Gap ist. Diese Heterostruktur-Bauweise ist im Prinzip dieselbe Technik, die auch bei HEMTs zum Einsatz kommt, nur mit dem Ziel der Ladungsträgereinfangung zur Rekombination statt

hoher lateraler Beweglichkeit.

Quantum Well ohne und mit QCSE

Räumliche Trennung von Elektron und Loch durch das interne Feld in InGaN/GaN



Starke Überlappung → hohe strahlende Rekombinationsrate;
getrennte Wellenfunktionen → reduzierte Effizienz.

Droop-Effekt und Auskopplungseffizienz

Zwei Effekte begrenzen die reale Effizienz einer LED unabhängig von der internen Materialqualität. Der Droop-Effekt bezeichnet den Effizienzabfall bei hohen Stromdichten, wie er sich im sogenannten ABC-Modell beschreiben lässt: Die Rekombinationsrate setzt sich aus einem defektbedingten Shockley-Read-Hall-Term ($A \cdot n$, linear), dem gewünschten strahlenden Term ($B \cdot n^2$, quadratisch) und einem nichtstrahlenden Auger-Term ($C \cdot n^3$, kubisch) zusammen. Bei niedrigen Ladungsträgerdichten n dominiert der strahlende B-Term, doch mit steigender Stromdichte wächst der Auger-Term (Drei-Teilchen-Prozess, bei dem die Rekombinationsenergie statt an ein Photon an ein drittes Ladungsträgerteilchen übertragen wird) überproportional schneller – die interne Quanteneffizienz erreicht daher ein Maximum bei moderater Stromdichte und fällt danach wieder ab, ausgerechnet im für hohe Helligkeit gewünschten Betriebsbereich. Die genauen physikalischen Ursachen des Auger-Anteils bei InGaN sind bis heute Gegenstand aktiver Forschung.

Der zweite limitierende Faktor ist die Auskopplungseffizienz. Da der Brechungsindex von GaN ($n \approx 2,4$) deutlich über dem von Luft ($n \approx 1$) liegt, definiert das Snelliussche Brechungsgesetz einen engen Grenzwinkel der Totalreflexion – nur Licht, das nahezu senkrecht auf die Grenzfläche trifft, verlässt den Chip direkt; der überwiegende Teil wird zurückgeworfen, mehrfach

im Chip reflektiert und dabei zunehmend absorbiert. Maßnahmen wie aufgeraute Oberflächen (Photonic Roughening), geformte Chip-Geometrien (z. B. abgeschrägte Seitenflächen), photonische Kristallstrukturen an der Auskoppelfläche oder Flip-Chip-Montage mit reflektierendem Rückkontakt brechen diese Totalreflexion gezielt auf und steigern die extern nutzbare Lichtausbeute erheblich – von oft unter 50 % bei unbehandelten Chips auf über 80 % bei optimierten Designs.

Von der Emission zur nutzbaren Lichtleistung

Für die praktische Bewertung einer LED ist die Kette aus mehreren Wirkungsgraden entscheidend, die multiplikativ zur sogenannten Wall-Plug-Efficiency (elektrische Leistung → sichtbares Licht) zusammenwirken: interne Quanteneffizienz (strahlende vs. nichtstrahlende Rekombination im Kristall), Auskopplungseffizienz (Chip → Luft, siehe oben), sowie bei weißen LEDs zusätzlich die Phosphor-Konversionseffizienz. Letztere unterliegt dem Stokes-Verlust: Da ein blaues Photon (hohe Energie) in ein gelbes Photon (niedrigere Energie) umgewandelt wird, geht die Energiedifferenz zwangsläufig als Wärme im Phosphor verloren – ein prinzipbedingter, nicht vermeidbarer Effizienzverlust bei phosphorkonvertierten weißen LEDs.

Hinzu kommt der thermische Droop: Steigende Chiptemperatur im Betrieb reduziert zusätzlich die interne Quanteneffizienz, weshalb effizientes Wärmemanagement (Submount-Material, thermische Vias, Gehäusedesign) für die reale Lichtausbeute ebenso wichtig ist wie die Halbleiterphysik selbst. In Summe erreichen moderne kommerzielle Weißlicht-LEDs Lichtausbeuten von über 150–200 lm/W, verglichen mit rund 15 lm/W bei klassischen Glühlampen.